

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫСАДКИ ФЛАНЦЕВЫХ УТОЛЩЕНИЙ ВРЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

## THEORETICAL STUDY OPERATIONS ISOTHERMAL HEADING FLANGE THICKENING IN SHORT-TERM CREEP

С.С. Яковлев, А.А. Пасынков

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула, пр. Ленина, 92,  
[mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru)

### Abstract

*The analysis of the operation of an isothermal drop-off flange bulges in the short-term creep mode. The influence of process parameters on power modes and limits of forming.*

Процессы обработки давлением заготовок из высокопрочных материалов проводятся с нагревом в изотермических условиях при регламентированных скоростях штамповки. Деформируемый материал проявляет вязкие свойства, связанные с ползучестью, и этот фактор влияет на силовые и деформационные режимы операций [1, 2].

Рассмотрим операцию набора (высадки) краевого утолщения на трубной заготовке в режиме кратковременной ползучести. Схемы деформаций принимаются осесимметричной и плоской, что определяется соотношениями диаметра трубы к ширине фланца (рис. 1).

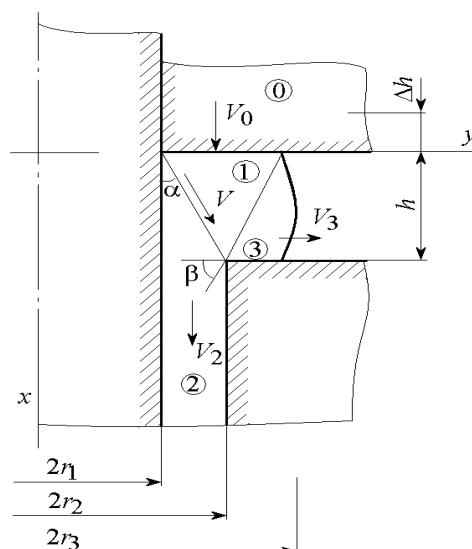


Рис. 1. Схема высадки и поле скоростей перемещений

При осесимметричной схеме операции поле состоит из блока деформаций «1», жестких блоков «2» и «3», разделенных соответствующими поверхностями разрыва скоростей. Инструмент обозначен как блок «0». Для расчета используется верхнегранная теорема пластичности [1, 2]. Для данной схемы операции она записывается в виде

$$\pi q (r_3^2 - r_1^2) V_0 \leq N_0 + N_{12} + N_{13} + N_{mp}. \quad (1)$$

Здесь левая часть – мощность внешних сил; правая – мощности деформаций, мощности на линиях разрыва скоростей и мощность трения.

Полагаем, что деформируемому материалу заготовки соответствует уравнение состояния [1, 2]:

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n, \quad (2)$$

где  $\sigma_e$ ,  $\varepsilon_e$ ,  $\xi_e$  – соответственно эквивалентные напряжения, деформации и скорости деформаций;  $A$ ,  $m$ ,  $n$  – константы материала. Уравнение (2) учитывает деформационное и скоростное упрочнение материала.

Рассмотрим объем деформаций. Зададим изменение скорости в нем при перемещении между поверхностями «12» и «13» функцией

$$V = \frac{V_0}{\cos \alpha} \left( 1 + \frac{1 - k(y - y_{12})}{y_{12} - y_{13}} \right) = \frac{V_0}{\cos \alpha} \left[ 1 + \frac{1 - k(y - x \cdot \operatorname{tg} \alpha - r_1)}{(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha)x + r_1 - r_3} \right] \quad (3)$$

при граничных условиях, соответствующих плану скоростей (рисунок2):

$$y_{12} = x \cdot \operatorname{tg} \alpha + r_1; \quad V = V_1 = \frac{V_0}{\cos \alpha};$$

$$y_{13} = -x \cdot \operatorname{ctg} \beta + r_3; \quad V = V_1' = V_3 \sin \alpha = \frac{V_0(r_3^2 - r_1^2)}{2hr_3} \sin \alpha.$$

Здесь  $x$ ,  $y$  - произвольные координаты точки в объеме деформаций;  $y_{12}$ ,  $y_{13}$  - уравнения образующих поверхностей разрыва скорости;  $V_1$ ,  $V_3$  - скорости на входе и выходе из объема деформаций;

$$k = \frac{r_3^2 - r_1^2}{4hr_3} \sin 2\alpha.$$

При заданной функции скорости (3) можно записать компоненты скорости деформации как

$$\xi_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} \cos \alpha;$$

$$\xi_y = \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y} \sin \alpha;$$

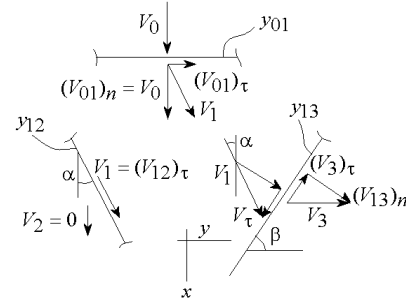


Рис.2. План скоростей на линиях разрыва при осесимметричном деформировании

$$\xi_\varphi = -\frac{\partial V}{\partial x} \cos \alpha - \frac{\partial V}{\partial y} \sin \alpha;$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} \sin \alpha + \frac{\partial V}{\partial y} \cos \alpha.$$

Компоненты скорости деформаций позволяют записать эквивалентную скорость деформаций и деформации в виде:

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\varphi^2) + \dot{\gamma}_{xy}^2 \right]^{1/2} =$$

$$= \frac{\sin \alpha}{\sqrt{3}} \left[ (1 + 4 \operatorname{ctg}^2 \alpha) \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + (2 + \operatorname{ctg}^2 \alpha) \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 6 \left( \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} \operatorname{ctg} \alpha \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$\varepsilon_e = \xi_e t = \frac{\Delta h}{V_0} \xi_e,$$

где  $\Delta h$  - величина осадки заготовки (см. рисунок1).

Полученные зависимости позволяют выразить мощность в объеме деформаций соотношением

$$N_{\ddot{a}} = \int_W \sigma_e \xi_e dW = 2\pi A \left( \frac{\Delta h}{V_0} \right)^m y_{\ddot{a}, \delta} \int_0^{y_{13}} \int_{y_{12}}^h \xi_e^{1+m+n} dy dx,$$

где  $y_{u,m}$  - ордината центра тяжести площади сечения объема деформаций плоскостью  $xy$  (см.

рис.1), определяемая по статическим моментам входящих фигур. Первое интегрирование здесь производится по ординате "y" при постоянном "x".

Выражения для определения мощностей на поверхностях разрыва скорости «12» и «13» записываются в виде

$$N_{12} = \pi A \left( \frac{1}{h} \sqrt{\frac{5}{3}} \right)^{m+n} \frac{r_2^2 - r_1^2}{\sin 2\alpha} (\Delta h)^m V_0^{1+n};$$

$$N_{13} = \frac{\pi A (r_3^2 - r_2^2)}{h^{1+2(m+n)}} \left( \frac{r_3^2 - r_1^2}{\sqrt{3} r_3} \right)^{1+m+n} \sqrt{3} p (\Delta h)^m (V_0)^{1+n},$$

где

$$p = \frac{(\sin \beta)^{m+n} [\sin \alpha \cdot \sin(\beta - \alpha) + \cos \beta]}{2^{2+m+n} \cos \beta} \left[ 1 + 4 \left( \frac{\sin \alpha \cdot \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}(m+n)}.$$

При равномерно распределенном по торцу фланца давлении касательное напряжение трения на этих поверхностях

$$\tau_{mp} = \mu q.$$

где  $\mu$  - коэффициент трения.

В этом случае мощность трения представим следующим выражением:

$$N_{mp} = \pi \mu q (r_3^2 - r_1^2) V_0 \left( \int_{r_1}^{r_3} K dy + \frac{r_3^2 - r_2^2}{2hr_3} \right),$$

$$\text{где } K = \left( 1 + \frac{1 - k(y - r_1)}{r_3 - r_1} \right) \operatorname{tg} \alpha.$$

В конечном виде давление высадки определяется выражением:

(4)

$$q \leq \frac{N_{\partial} + N_{12} + N_{13}}{\pi(r_3^2 - r_1^2)V_0 \left[ 1 - \mu \left( \int_{r_1}^{r_3} K dy + \frac{r_3^2 - r_2^2}{2hr_3} \right) \right]}$$

Данную задачу можно решать при некоторых условиях на относительные размеры диаметра фланца как плоскую. В этом случае поле скоростей является жесткоблочным. Деформации имеют место только на линиях разрыва скорости и контактной границе трения. Кинематика поля устанавливается по годографу скоростей (рисунок 3).

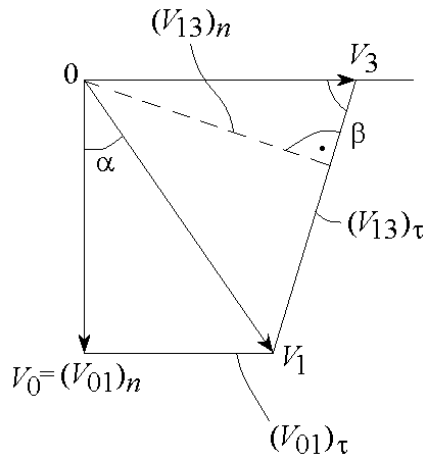


Рис.3. Годограф скоростей при плоском деформировании

Скорости движения блоков:

$$V = V_1 = \frac{V_0}{\cos \alpha}; \quad V_2 = 0;$$

$$V_3 = V_0 \frac{r_3 - r_1}{h}.$$

Мощности трения на поверхностях «12» и «13» записываются в виде:

$$N_{12} = \frac{A}{(\sqrt{3})^{m+n}} h^{1-m-n} \frac{(\Delta h)^m V_0^{1+n}}{\cos^2 \alpha};$$

$$N_{13} = \frac{A}{(\sqrt{3})^{m+n}} \left( \frac{h}{2} \right)^{1-m-n} \frac{(\Delta h)^m V_0^{1+n}}{\sin^2 \beta}.$$

Мощность на границах трения представляется соотношением

$$N_{\partial\partial} = \mu q (r_3 - r_1) V_0 \left( \operatorname{tg} \alpha + \frac{r_3 - r_2}{h} \right).$$

Учитывая, что энергетическое неравенство (1) для плоской деформации имеет вид

$$q(r_3 - r_1) V_0 \leq N_{12} + N_{13} + N_{mp},$$

получим следующую оценку давления:

$$q \leq \frac{N_{12} + N_{13}}{(r_3 - r_1) V_0 \left[ 1 - \mu \left( \operatorname{tg} \alpha + \frac{r_3 - r_2}{h} \right) \right]} \quad (5)$$

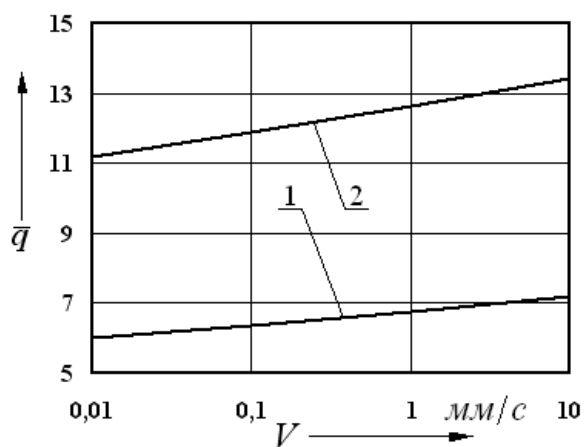
На основе приведенных выше соотношений выполнены теоретические исследования влияния технологических параметров на силовые режимы операции высадки с нагревом фланцевых утолщений на трубных заготовках. Исследования выполнены для алюминиевого АМг6 и титанового ВТ6С сплавов, поведение которых описывается энергетической и кинетической теориями ползучести соответственно. Механические характеристики исследуемых материалов приведены в таблице 2.1. Расчеты выполнены при следующих геометрических характеристиках заготовки:  $h = 30$  мм;

$$\Delta h = 10 \text{ мм}; \quad r_1 = 17 \text{ мм}; \quad r_2 = 20 \text{ мм}.$$

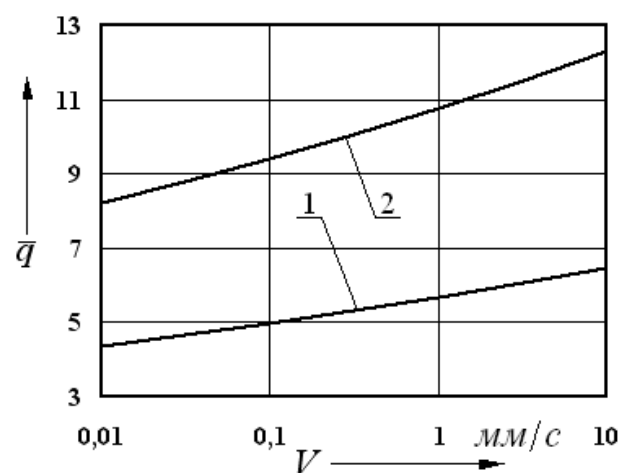
На рисунке 4 представлены графические зависимости относительного давления  $\bar{q} = q / \sigma_{e0}$

от скорости перемещения пуансона  $V$ . Здесь кривая 1 соответствует расчетам, выполненным по модели осесимметричной деформации, кривая 2 – плоской деформации.

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением скорости перемещения инструмента  $V$  от 0,01 до 10 мм/с относительное давление высадки трубных заготовок возрастает на 20 % для алюминиевого АМг6 и на 50 % для титанового ВТ6С сплавов. Результаты, полученные по модели плоской деформации, дают оценку давления в 1,9 раза большую, чем по модели осесимметричной деформации.



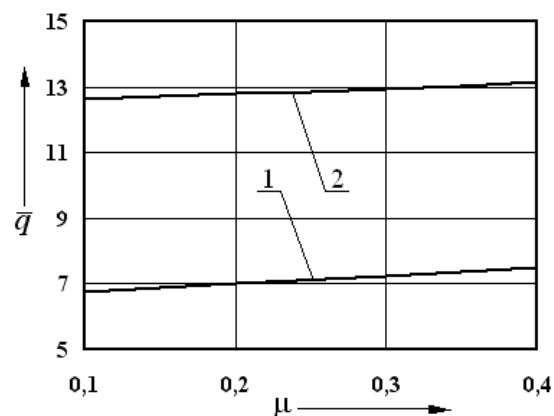
а)



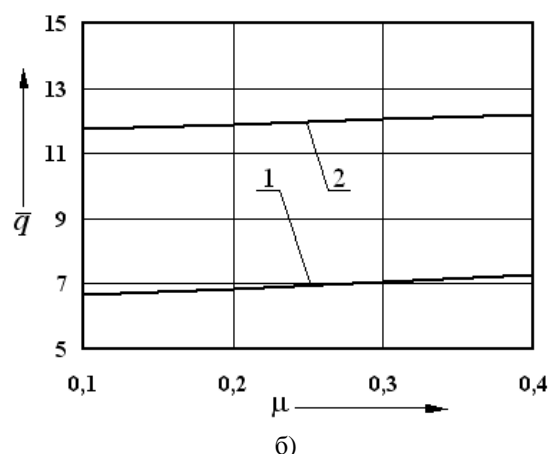
б)

Рис. 4. Зависимости изменения  $\bar{q}$  от  $V$  при высадке трубных заготовок из сплавов АМг6 (а) и ВТ6С (б) ( $\mu = 0,1$ )

Результаты исследования влияния условий трения на инструменте на относительное давление высадки трубных заготовок представлены на рисунке 5. Установлено, что с увеличением коэффициента трения  $\mu$  от 0,1 до 0,4 относительное давление высадки сплавов АМг6 и ВТ6С возрастает на 10...15%. Результаты расчетов по модели плоской деформации дают завышенную оценку давления по сравнению с моделью осесимметричной деформации в 1,7...1,9 раза.



а)



б)

Рис.5. Зависимости изменения  $\bar{q}$  от  $\mu$  при высадке трубных заготовок из сплавов АМг6 (а) и ВТ6С (б) ( $V = 1 \text{ мм/с}$ )

Произведена оценка повреждаемости деформируемого металла и связанные с этим критические режимы операции. Деформации имеют место на поверхностях разрыва скоростей «12» и «13». В соответствии с кинетической теорией прочности запишем:

$$\omega_{12} = \frac{\sqrt{5}\Delta h}{\sqrt{3}h(\epsilon_e)_{np}}; \quad \omega_{13} = \frac{k(r_3^2 - r_1^2)\Delta h}{\sqrt{3}h^2 r_3(\epsilon_e)_{np}},$$

где  $0 \leq \omega \leq 1$  - повреждаемость материала при ходе пресса  $0 \leq \Delta h \leq (\Delta h)_{\hat{e}\delta}$ ;  $(\Delta h)_{\hat{e}\delta}$  - критическая величина хода, связанная с возможным разрушением заготовки;  $(\epsilon_e)_{i\delta}$  - предельная эквивалентная деформация;

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \left( \frac{\sin \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta} + \text{ctg} \beta \right)^2} \sin \beta.$$

В соответствии с энергетической теорией

$$\omega_{12} = \frac{A}{A_{np}} \left( \frac{1}{h} \sqrt{\frac{5}{3}} \right)^{1+m+n} \frac{(\Delta h)^{1+m}}{1+m} V_0^n;$$

$$\omega_{13} = \frac{A}{A_{np}} \left( \frac{k(r_3^2 - r_1^2)}{\sqrt{3}h^2 r_3} \right)^{1+m+n} \frac{(\Delta h)^{1+m}}{1+m} V_0^n,$$

где  $A_{np}$  - предельная удельная работа разрушения.

При плоской деформации по кинетической теории прочности будем иметь:

$$\omega_{12} = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}h(\varepsilon_e)_{np}}; \quad \omega_{13} = \frac{2\Delta h}{\sqrt{3}h(\varepsilon_e)_{np}}.$$

По энергетической теории:

$$\omega_{12} = \frac{A}{A_{np}} \left( \frac{1}{\sqrt{3}h} \right)^{1+m+n} \frac{(\Delta h)^{1+m}}{1+m} V_0^n;$$

$$\omega_{13} = \frac{A}{A_{np}} \left( \frac{2}{\sqrt{3}h} \right)^{1+m+n} \frac{(\Delta h)^{1+m}}{1+m} V_0^n.$$

Из приведенных выше выражений следует, что повреждаемость материалов, которым соответствует кинетическая теория прочности, определяется величиной деформации и не зависит от скорости. Повреждаемость и, следовательно, критические условия операции для материалов, которым соответствует энергетическая теория, зависят от скорости операции.

Критические величины рабочего хода или скорости операции определяются из полученных зависимостей при условии  $\omega = 1$ .

На рисунке 6 представлены графические зависимости повреждаемости материала на поверхностях разрыва скоростей «12» и «13» от скорости перемещения инструмента  $V$  при высадке трубных заготовок из алюминиевого сплава АМг6.

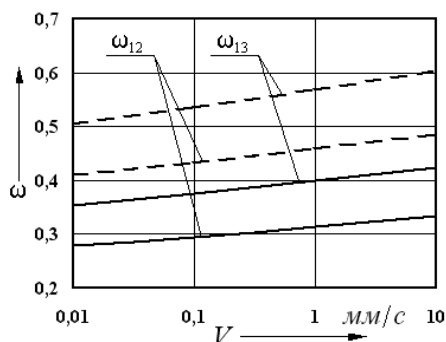


Рис.6. Зависимости изменения  $\omega$  от  $V$  при высадке трубных заготовок из сплава АМг6 ( $\varepsilon = 0,5$ )

Сплошными линиями показаны результаты расчета по модели осесимметричной деформации, штриховыми – по модели плоской деформации. Установлено, что с увеличением скорости перемещения пуансона от 0,01 до 10 мм/с повреждаемость материала возрастает на 20%. Результаты расчетов по модели плоской деформации дают завышенную оценку повреждаемости по сравнению с моделью осесимметричной деформации в 1,4...1,8 раза.

Результаты расчета повреждаемости титанового сплава ВТ6С на поверхностях разрыва скоростей «12» и «13» в зависимости степени деформации  $\varepsilon = \Delta h/h_0$  приведены на рисунке 7. Сплошные линии соответствуют данным, полученным по модели осесимметричной деформации, штриховые – плоской деформации.

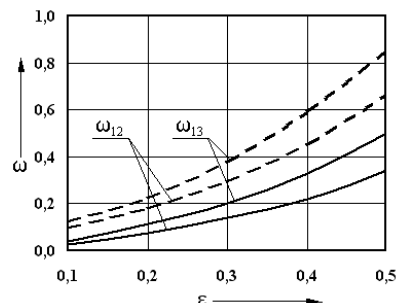


Рис.7. Зависимости изменения  $\omega$  от  $\varepsilon$  при высадке трубных заготовок из сплава ВТ6С ( $V = 1$  мм/с)

Анализ графических зависимостей показывает, что при увеличении  $\varepsilon$  от 0,1 до 0,5 повреждаемость сплава ВТ6С существенно возрастает. Максимальные значения повреждаемости имеют место на линии разрыва «13». Результаты расчетов по модели плоской деформации дают завышенную оценку величины повреждаемости по сравнению с моделью осесимметричной деформации в 1,7...1,9 раза.

Таким образом, установлено, что силовые параметры высадки зависят от деформационного и скоростного упрочнений материала заготовки, а также условий трения на инструменте. Развитие повреждаемости материала и, следовательно, предельные степени высадки для ряда материалов определяются скоростными условиями деформирования, для ряда – степенью деформации. Результаты расчетов по модели плоской деформации дают завышенную оценку величин давления и повреждаемости по сравнению с моделью осесимметричной деформации в 1,4...1,9 раза.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012-2014 годы и грантам РФФИ.

### Список литературы

1. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.
2. Теория обработки металлов давлением / Учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь // Под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.